Opérateur CALC_ELEM

1 But

Créer ou compléter un résultat en calculant des champs par éléments (contraintes, déformations, …).

Chaque champ élémentaire désiré est caractérisé par le mot clé OPTION ('SIGM_ELNO', 'FLUX_ELGA', 'VARI_ELNO', …).

Le concept résultat produit est soit créé, soit **modifié**, c'est-à-dire que l'appel à CALC_ELEM se fait de la façon suivante :

```
resu = CALC_ELEM (   RESULTAT = resu … ,   reuse = resu , …)
```

ou bien

```
resu1 = CALC_ELEM   (   RESULTAT = resu, …)
```

Table des Matières

2 Syntaxe

```
resu   [*] = CALC_ELEM

            ( ◊  reuse = resu,
              ◊  MODELE =           mo,                     [modele]
              ◊  CHAM_MATER =       chmater,                [cham_mater]
              ◊  CARA_ELEM =        carac,                  [cara_elem]
              ◊  SOLVEUR = _F ( voir le document [U4.50.01] ),
              ◊  EXCIT = _F   (      ♦  CHARGE = l_charge,  [l_char_meca]
                                     ◊  / COEF_MULT  = cm,  [R]
                                        / COEF_MULT_C= cmc, [C]
                                        / FONC_MULT  = fm,  [fonction]
                                        / FONC_MULT_C= fmc, [fonction_C]
                                     ◊  PHAS_DEG  = pd,     [R]
                                     ◊  PUIS_PULS = n,      [I]
                                     ◊  TYPE_CHARGE = 'FIXE',
                                 )
              ◊  #  Sélection des mailles concernées par le calcul
                 /  TOUT =    'OUI',                        [DEFAUT]
                 /  |  GROUP_MA =   l_grma ,                [l_gr_maille]
                    |  MAILLE   =   l_mail ,                [l_maille]

              ♦  #  Sélection des numéro d'ordre :
                 /  TOUT_ORDRE =     'OUI',
                 /  NUME_ORDRE =     l_nuor ,               [l_I]
                 /  LIST_ORDRE =     l_nuor ,               [listis]
                 /  NUME_MODE  =     l_numo ,               [l_I]
                 /  NOEUD_CMP  =     l_nomo ,               [l_K16]
                 /  NOM_CAS    =     nocas  ,               [K16]
                 /  ♦  /   INST =       l_inst ,            [l_R]
                       /  FREQ =    l_freq ,                [l_R]
                       /  LIST_INST =  l_inst ,             [listr8]
                       /  LIST_FREQ =  l_freq ,             [listr8]
                    ◊  |  P RECISION = / prec,
                                       / 1.0E-3,            [DEFAUT]
                       |  CRITERE =    / 'RELATIF',         [DEFAUT]
                                       / 'ABSOLU' ,

              ◊  REPE_COQUE

                 ◊  /  TOUT      =  'OUI'  ,                [DEFAUT]
                    /  MAILLE    =  lmail  ,                [l_maille]
                    /  GROUP_MA  =  gma    ,                [group_ma]

                    ◊  ANGLE =   /  delta,                  [I]
                                 /  0.,                     [DEFAUT]

                    ◊  PLAN =    /  'MAIL',                 [DEFAUT]
                                 /  'MOY',
                                 /  'INF',
                                 /  'SUP',

                    ◊  |  NUME_COUCHE =    /  nume,         [I]
                                           /  1,            [DEFAUT]
                       |  NIVE_COUCHE =    /  'INF',
                                           /  'SUP',
                                           /  'MOY'         [DEFAUT]
                    ◊  ANGLE_REP=( α , β )                  [l_R]
                    ◊  VECTEUR   =(x,y,z)                   [l_R]
```

options pour des résultats mécaniques linéaires

♦ RESULTAT = resu,

◊ TYPE_OPTION = 'TOUTES' [DEFAUT]
OPTION = toutes les options ci-dessous,

options de calcul des contraintes (éléments de milieu continu 2D et 3D) (cf. [§2.5.1])

```
TYPE_OPTION =     'SIGM_MASSIF',

          OPTION =  |  'SIEF_ELNO'
                    |  'SIGM_ELNO'
                    |  'SIEF_ELGA'
                    |  'PROJ_ELEM'
```

options de calcul des contraintes (éléments de structure : poutres, tuyaux, coques) (cf. [§2.5.1])

```
TYPE_OPTION =     'SIGM_STRUCT',
    ♦  OPTION =     |  'SIEF_ELNO'
                    |  'SIGM_ELNO'
                    |  'SIEF_ELGA'
                    |  'SITU_ELNO'
                    |  'SIPO_ELNO'
                    |  'EFGE_ELNO'
                    |  'EFCA_ELNO'
                    |  'SICA_ELNO'
```

options de calcul des flux hydrauliques (éléments THM) (cf. [§2.5.8])

```
TYPE_OPTION =     'FLUX',
    ♦  OPTION   =   |  'FLHN_ELGA'
```

options de calcul des déformations(cf. [§2.5.2])

```
TYPE_OPTION =     'EPSI',
    ♦  OPTION   =   |  'EPSI_ELNO'
                    |  'EPSI_ELGA'
                    |  'EPME_ELNO'
                    |  'EPME_ELGA'
                    |  'DEGE_ELNO'
                    |  'EPTU_ELNO'
                    |  'EPVC_ELNO'
                    |  'EPVC_ELGA'
```

options de calcul d'énergies (cf. [§2.5.4])

```
TYPE_OPTION =     'ENER',
    ♦  OPTION   =   |  'EPOT_ELEM'
                    |  'ECIN_ELEM'
                    |  'ENEL_ELGA'
                    |  'ENEL_ELNO'
                    |  'ETOT_ELGA'
                    |  'ETOT_ELNO'
                    |  'DISS_ELGA'
                    |  'DISS_ELNO'
```

```
                              |   'ETOT_ELEM'
```

options de calcul de critères (cf. [§2.5.5])

```
TYPE_OPTION =     'CRIT',
    ♦  OPTION   =   |   'SIEQ_ELNO'
                    |   'SIEQ_ELGA'
                    |   'EPEQ_ELNO'
                    |   'EPEQ_ELGA'
                    |   'EPMQ_ELNO'
                    |   'EPMQ_ELGA'
                    |   'ENDO_ELGA'
                    |   'ENDO_ELNO'
                    |   'SITQ_ELNO'
                    |   'EPTQ_ELNO'
                    |   'CRIT_ELNO'
```

options de calcul d'indicateurs d'erreur(cf. [§2.5.6])

```
TYPE_OPTION =     'INDI_ERRE',
    ♦  OPTION   =   |   'SIZ1_NOEU'
                    |   'ERZ1_ELEM'
                    |   'SIZ2_NOEU'
                    |   'ERZ2_ELEM'
                    |   'ERME_ELEM'
                    |   'ERME_ELNO'
```

autres options (cf. [§2.5.7])

```
TYPE_OPTION =     'AUTRES',
    ♦  OPTION   =   |   'SPMX_ELGA'
                        ◊  NOM_CHAM = ch,   [cham_elem_*]
                        ◊  NOM_CMP  = cmp,  [TXM]

                    |   'PRES_DBEL_DEPL'
                    |   'VNOR_ELEM_DEPL'
                    |   'VARC_ELGA'
```

options pour les résultats non linéaires (produits par `STAT_NON_LINE` ou `DYNA_NON_LINE`) :

```
♦  RESULTAT =   resu,                        /  [evol_noli]

◊  TYPE_OPTION =     'TOUTES'                   [DEFAUT]
♦  OPTION = toutes les options ci-dessous,
```

\# options de calcul des contraintes (éléments de milieux continus 2D et 3D) (cf. [§2.5.1])

```
TYPE_OPTION =     'SIGM_MASSIF,
   ♦  OPTION   =       |  'SIEF_ELNO'
                       |  'PROJ_ELEM'
```

\# options de calcul des contraintes (éléments de structure : poutres, tuyaux, coques) (cf. [§2.5.1])

```
TYPE_OPTION =     'SIGM_STRUCT',
   ♦  OPTION   =       |  'SIEF_ELNO'
                       |  'EFCA_ELNO'
                       |  'SITU_ELNO'
                       |  'SICO_ELNO'
```

\# options de calcul des déformations (cf. [§2.5.2])

```
TYPE_OPTION =     'EPSI',
   ♦  OPTION   =       |  'EPSI_ELNO'
                       |  'EPSI_ELGA'
                       |  'EPSG_ELNO'
                       |  'EPSG_ELGA'
                       |  'EPME_ELNO'
                       |  'EPME_ELGA'
                       |  'EPMG_ELNO'
                       |  'EPMG_ELGA'
                       |  'EPSP_ELNO'
                       |  'EPSP_ELGA'
                       |  'EPFD_ELNO'
                       |  'EPFD_ELGA'
                       |  'EPFP_ELNO'
                       |  'EPFP_ELGA'
                       |  'EPVC_ELNO'
                       |  'EPVC_ELGA'
                       |  'EPTU_ELNO'
                       |  'DEGE_ELNO'
```

\# options d'interpolation et d'extraction des variables internes (cf. [§2.5.3])

```
TYPE_OPTION =     'VARI',
   ♦  OPTION   =       |  'VARI_ELNO'
                       |  'VATU_ELNO'
                       |  'VACO_ELNO'
                       |  'EXTR_ELGA'
                       |  'EXTR_ELNO'
```

options de calcul d'énergies (cf. [§2.5.4])

```
TYPE_OPTION =     'ENER',
   ♦  OPTION   =       |  'ETOT_ELGA'
                       |  'ETOT_ELNO'
                       |  'ETOT_ELEM'
                       |  'ENEL_ELGA'
                       |  'ENEL_ELNO'
```

options de calcul de critères (cf. [§2.5.5])

```
TYPE_OPTION =     'CRIT,
   ♦  OPTION   =       |  'SIEQ_ELNO'
                       |  'SIEQ_ELGA'
                       |  'EPEQ_ELNO'
                       |  'EPEQ_ELGA'
                       |  'EPMQ_ELNO'
                       |  'EPMQ_ELGA'
                       |  'CRIT_ELNO'
                       |  'ENDO_ELGA'
                       |  'ENDO_ELNO'
                       |  'PMPB_ELNO'
                       |  'PMPB_ELGA'
                       |  'INDL_ELGA'
                       |  'SITQ_ELNO'
                       |  'EPTQ_ELNO'
```

options de calcul d'indicateurs d'erreur(cf. [§2.5.6])])

```
TYPE_OPTION =     'INDI_ERRE',
   ♦   OPTION   =      |  'ERME_ELEM'
                       |  'ERZ1_ELEM'
                       |  'ERZ2_ELEM'
                       |  'QIZ1_ELEM'
                       |  'QIZ2_ELEM'
                       |  'SING_ELEM'
                          ♦  PREC_ERR  = err,    [R]
                       |  'SING_ELNO'
                       |  'ERME_ELNO'
                       |  'QIRE_ELEM'
                          ♦  RESU_DUAL = rd ,    [evol_noli]
                       |  'QIRE_ELNO'
                       |  'DERA_ELGA'
                       |  'DERA_ELNO'
```

autres options (cf. [§2.5.7])

```
TYPE_OPTION =     'AUTRES',
   ♦  OPTION   =       |  'SPMX_ELGA'
      ◊  NOM_CHAM = ch,                       [cham_elem_*]
      ◊  NOM_CMP  = cmp,                      [TXM]
```

options de calcul des flux hydrauliques (éléments THM) (cf. [§2.5.8])

```
TYPE_OPTION =     'FLUX',
   ♦  OPTION   =   |  'FLHN_ELGA'
```

```
            /   #   options thermiques

                ♦       OPTION =     |   'FLUX_ELNO',
                                     |   'FLUX_ELGA',
                                     |   'ERTH_ELEM',
                                     |   'ERTH_ELNO',
                                     |   'SOUR_ELGA',
                                     |   'DURT_ELGA_META',
                                     |   'DURT_ELNO',
                                     |   'HYDR_ELNO',
                ♦   RESULTAT =   resu,              /   [evol_ther]

            /   #   options acoustiques
                ♦       OPTION =     |   'PRAC_ELNO',
                                     |   'INTE_ELNO',
                ♦   RESULTAT  =  resu,              /   [acou_harmo]
                                                    /   [mode_acou]

        ◊   TITRE = titre,                              [l_Kn]
        ◊   INFO  =   /  1,                             [DEFAUT]
                      /  2,

    );
```

2.1 Opérandes RESULTAT/MODELE/CHAM_MATER/CARA_ELEM/EXCIT/ SOLVEUR

2.1.1 Opérandes RESULTAT

♦ RESULTAT = resu

Nom de la structure de données résultat à enrichir. Cet argument peut être le même que celui utilisé pour le concept enrichi par l'opérateur, ou un nom différent, ce qui créera une nouvelle structure de données résultat (voir par exemple le test SSLS504 [V3.03.504].

Remarque : dans la majorité des situations, la structure de données resu contient toutes les informations nécessaires au calcul des options : le modèle, le champ de matériau, les caractéristiques élémentaires, les chargements. Les mots-clés MODELE, CHAM_MATER, CARA_ELEM et EXCIT sont donc inutiles.

2.1.2 Opérandes MODELE / CHAM_MATER / CARA_ELEM.

◊ MODELE = mo

Nom du modèle sur lequel sont calculés les efforts, les contraintes, les déformations, …. Il est optionnel car peut être extrait du résultat.

◊ CHAM_MATER = chmater

Champ de matériau associé au modèle mo. Ce mot-clé est optionnel, et ne doit être fourni que dans des cas exceptionnels (modification volontaire du matériau par exemple).

◊ CARA_ELEM = carac

Caractéristiques élémentaires associées au modèle mo, s'il contient des éléments de structure ou si les éléments iso-paramétriques sont affectés par un repère local d'anisotropie. Ce mot-clé est optionnel.

2.1.3 Mot clé EXCIT

Ce mot clé facteur (optionnel) permet de spécifier les chargements thermiques ou mécaniques à utiliser pour le calcul des options, en lieu et place de ceux qui ont servi dans le calcul de la structure de données spécifiée sous le mot clé RESULTAT.

La définition de ce mot-clé est identique à celle des commandes qui ont construit la structure de données resu : voir les commandes MECA_STATIQUE [U4.51.01], STAT_NON_LINE [U4.51.03], DYNA_LINE_HARM [U4.53.11], et DYNA_LINE_TRAN [U4.53.02].

2.1.4 Mot clé SOLVEUR

La syntaxe de ce mot clé commun à plusieurs commandes est décrite dans le document [U4.50.01].
Remarque : dans la commande, le solveur n'est utilisé que pour l'estimateur d'erreur 'ZZ1'. Les 3 solveurs autorisés sont 'LDLT', 'MULT_FRONT' et 'MUMPS' (défaut : MULT_FRONT). En toute rigueur, le solveur MUMPS n'est pas recommandé car il ne sait pas (encore) traiter STOP_SINGULIER='NON'.

2.2 Sélection des mailles concernées par le calcul

Les mots clés TOUT, GROUP_MA et MAILLE permettent à l'utilisateur de choisir les mailles sur lesquelles il souhaite faire ses calculs élémentaires de post-traitement.

/ TOUT = 'OUI'

Toutes les mailles (porteuses d'éléments finis) seront traitées. C'est la valeur par défaut.

```
/ | GROUP_MA  =  l_grma
  | MAILLE    =  l_maille
```

Seules les mailles incluses dans `l_grma` et/ou `l_maille` seront traitées.

2.3 Définition d'un repère local de dépouillement : opérande REPE_COQUE

Ce mot-clé facteur est répétable. Il regroupe les mots-clés simples utilisés pour le post-traitement des coques et tuyaux (`NUME_COUCHE`, `NIVE_COUCHE`, `ANGLE` et `PLAN`) et les mot-clés définissant le repère local (`ANGL_REP` et `VECTEUR`) du mot-clé facteur `COQUE` de la commande `AFFE_CARA_ELEM`. De plus, la présence des mot-clés `GROUP_MA / MAILLE / TOUT` (facultatif avec `TOUT='OUI'` en défaut), permet de définir le repère local de post-traitement et la localisation groupe de mailles par groupe de mailles (exemple, faire le calcul des contraintes sur le tuyau coude en une seule fois).

`MAILLE`

```
/ MAILLE = lmail
```

Ce mot clé permet d'appliquer les hypothèses sur les mailles dont la liste est indiquée en argument.

`TOUT`

```
/ TOUT = 'OUI'
```

Ce mot clé permet d'appliquer les hypothèses sur toutes les mailles du maillage.

`GROUP_MA`

```
/ GROUP_MA =   gma
```

Ce mot clé permet d'appliquer les hypothèses sur le groupe de mailles `gma` indiqué en argument.

◊ `NUME_COUCHE = nume`

Dans le cas d'un matériau multicouche (coque multicouche définie par `DEFI_COQU_MULT`), ou d'un élément de structure avec comportement non linéaire local, intégré par couches, `NUME_COUCHE` est la valeur entière comprise entre 1 et le nombre de couches, nécessaire pour préciser la couche où l'on désire effectuer le calcul élémentaire. Par convention, la couche 1 est la couche inférieure (dans le sens de la normale) dans le cas des éléments de coque mécanique ou de coque thermique et correspond à la couche interne dans le cas d'un élément `TUYAU`.

◊ `NIVE_COUCHE =`

Pour la couche `nume` définie par `NUME_COUCHE`, permet de préciser l'ordonnée où l'on désire effectuer le calcul élémentaire :

`'INF'`	ordonnée inférieure de la couche	(peau interne),
`'SUP'`	ordonnée supérieure de la couche	(peau externe),
`'MOY'`	ordonnée moyenne de la couche	(feuillet moyen).

```
◊ PLAN =   /'MAIL'        [DEFAUT]
           /'MOY'
           /' INF'
           /' SUP'
```

- `'MAIL'` : plan du maillage,
- `'MOY'` : plan moyen,
- `'INF'` : plan supérieur (dans le sens de la normale),
- `'SUP'` : plan inférieur (dans le sens de la normale).

Cet opérande permet de spécifier le plan de calcul des champs élémentaires pour un modèle avec des éléments de plaques en tenant compte de l'excentrement éventuel.

Limitations : cette option n’est disponible que pour le calcul des efforts généralisés par éléments aux nœuds à partir des déplacements (élasticité linéaire), option EFGE_ELNO.

De plus, cette option n’est utilisable que pour les DKT, DST, Q4G, GRILLE.

```
◊  ANGLE =   /  delta,                   [I]
             /  0.,                      [DEFAUT]
```

- delta : angle en degrés (valeur entière) compté à partir de la position de la génératrice de l’élément tuyau,

◊ / VECTEUR = (x, y, z) [l_R] (par défaut, VECTEUR=(1, 0, 0))
/ ANGL_REP = (α, β) [l_R]

Mots clés permettant la construction d’un repère local aux éléments de coques ou de plaques, afin de calculer les champs produits par les options demandées (contraintes, efforts, …) dans ce repère local.

La définition de ce repère local est identique à celle de l’opérateur AFFE_CARA_ELEM [U4.42.01] .

2.4 Sélection des numéros d'ordre

L’emploi des mots-clés TOUT_ORDRE, NUM_ORDRE, INST,FREQ est décrit dans le document [U4.71.00].

2.5 Opérandes pour les options mécaniques

2.5.1 Option de calcul des contraintes

| 'SIEF_ELGA'

Calcul de l'état de contrainte par élément aux points d'intégration de l'élément (points de GAUSS ou points d’intégrations pour chaque couche des éléments de coque et chaque secteur des éléments tuyaux) à partir des déplacements (élasticité linéaire), voir [U2.01.05].

| 'SIEF_ELNO'

Calcul de l'état de contrainte aux nœuds (par élément) à partir de l’état de contrainte aux points de Gauss.

| 'SIGM_ELNO'

Calcul des contraintes par élément aux nœuds à partir des déplacements (élasticité linéaire).

```
|  'SICO_ELNO'
|  'NUME_COUCHE' =  nume,
                    1,                 [DEFAUT]
|  'NIV_COUCHE'  =  /  'INF',
                    /  'SUP',
                    /  'MOY',          [DEFAUT]
```

Calcul des contraintes **dans une couche** d’éléments de coque (mots clés NUME_COUCHE et NIVE_COUCHE) à partir des contraintes aux points d’intégration de chaque couche (SIEF_ELGA) calculées lors d’un calcul non linéaire. Ces contraintes sont calculées dans le repère local de la coque défini par l’utilisateur dans la commande AFFE_CARA_ELEM. Dans le cas des coques en grands déplacements et grandes rotations (COQUE_3D avec DEFORMATION='GROT_GDEP'), cette option intègre également le calcul des contraintes de Cauchy à partir des contraintes de Piola-Kirchhoff. Les contraintes issues de cette option sont donc des contraintes de Cauchy dans une couche.

| 'SITU_ELNO'

Calcul des contraintes **dans une couche** et pour un secteur angulaire d'éléments tuyau (mots clés `REPE_COQUE / NUME_COUCHE`, `NIVE_COUCHE` et `ANGLE`).

| `'SICA_ELNO'`
`'EFCA_ELNO'`

Changement de repère des contraintes (ou des efforts généralisés) par élément aux nœuds du repère local au repère **global** de description du maillage ; cette option consiste à convertir un champ de contrainte (ou d'efforts généralisés) pour un modèle avec des éléments de structure, attachés au repère de référence d'un ensemble de plaques ou de coques ou du repère d'inertie principal d'un élément de poutre, pour les exprimer dans le repère global.

| `'EFGE_ELNO'`

```
        ◊  REPE_COQUE
            ◊  PLAN =     /'MAIL'          [DEFAUT]
                          /'MOY'
                          /' INF'
                          /' SUP'
```

Calcul des efforts généralisés par élément aux nœuds à partir des déplacements (élasticité linéaire) ; cette option n'a de sens que pour un modèle avec des éléments de structure (poutre, coque).

Dans le cas des modélisations de plaques avec excentrement (`DKT`, `DST`, `Q4G`, `GRILLE`), `PLAN` permet de définir le plan de calcul :

- `'MAIL'` : plan du maillage,
- `'MOY'` : plan moyen,
- `'INF'` : plan supérieur (dans le sens de la normale),
- `'SUP'` : plan inférieur (dans le sens de la normale).

| `'SIPO_ELNO'`

"Contraintes" dans la section de poutre décomposée en contributions de chaque effort généralisé :

`SN` $\sigma_{xx}=\frac{N}{A}$ due à l'effort normal

`SMFY` $\sigma_{xx}=\frac{MY\,z}{I_y}$ due au moment de flexion MY

`SMFZ` $\sigma_{xx}=\frac{MZ\,y}{I_z}$ due au moment MZ

`SVY` $\sigma_{xy}=\frac{Vy\,a_y}{A}$ due à l'effort tranchant Vy, a_y coefficient de cisaillement dans la direction y

`SVZ` $\sigma_{xz}=\frac{Vz\,a_z}{A}$ due à l'effort tranchant Vz, a_z coefficient de cisaillement dans la direction z

`SMT` $\sigma_{yz}=\frac{MX\,R_t}{J_x}$ due au moment de torsion MX

Tout ceci en repère local, repère principal d'inertie de la section droite [R3.08.01].

Les valeurs de σ_{xx} dues aux deux moments de flexion sont les valeurs maximum de celles calculées en $Ymin$, $Ymax$ d'une part, et en $Zmin$, $Zmax$ d'autre part (pour une section générale) (cf. `AFFE_CARA_ELEM` [U4.42.01]).

Pour une section rectangulaire :

- on calcule la valeur de $SMFY$ en $z=HZ/2$,
- on calcule la valeur de $SMFZ$ en $y=HY/2$.

Pour une section circulaire, on calcule les valeurs de `SMFY` et `SMFZ` pour y et z valant R .

`'PROJ_ELEM'`

Calcul des champs de contraintes par éléments sur les parements (surfaces) amont et aval d'un ouvrage hydraulique alors que la structure est modélisée en volumique :

Les composantes de ces champs sont les suivantes :

- Contraintes normales aux faces des éléments, calculées aux centres des faces :
  - `SIG_NX` : composante suivant X, dans le repère global, de la contrainte normale
  - `SIG_NY` : composante suivant Y, dans le repère global, de la contrainte normale
  - `SIG_NZ` : composante suivant Z , dans le repère global, de la contrainte normale
  - `SIG_N` : contrainte normale
- Contraintes tangentes aux faces des éléments, calculées aux centres des faces :
  - `SIG_TX` : composante suivant X, dans le repère global, de la contrainte tangentielle
  - `SIG_TY` : composante suivant Y, dans le repère global, de la contrainte tangentielle
  - `SIG_TZ` : composante suivant Z, dans le repère global, de la contrainte tangentielle
- Rosettes des contraintes : valeurs principales des contraintes projetées sur le plan tangent à la face d'élément, calculées aux centres des faces, première valeur des contraintes projetées :
  - `SIG_T1X` : composante suivant X, dans le repère global, de la première valeur principale des contraintes projetées sur le plan tangent.
  - `SIG_T1Y` : composante suivant Y, dans le repère global, de la première valeur principale des contraintes projetées sur le plan tangent.
  - `SIG_T1Z` : composante suivant Z, dans le repère global, de la première valeur principale des contraintes projetées sur le plan tangent.
  - `SIG_T1` **:** première valeur principale des contraintes tangentielle
- Rosettes des contraintes : valeurs principales des contraintes projetées sur le plan tangent à la face d'élément, calculées aux centres des faces, deuxième valeur des contraintes projetées
  - `SIG_T2X` : composante suivant X, dans le repère global, de la deuxième valeur principale des contraintes projetées sur le plan tangent.
  - `SIG_T2Y` : composante suivant Y, dans le repère global, de la deuxième valeur principale des contraintes projetées sur le plan tangent.
  - `SIG_T2Z` : composante suivant Z, dans le repère global, de la deuxième valeur principale des contraintes projetées sur le plan tangent.
  - `SIG_T2` **:** deuxième valeur principale des contraintes tangentielle

Ces champs sont évalués à partir d'un champ de contraintes aux nœuds par élément (option `SIGM_ELNO` dans le cas linéaire ou option `SIEF_ELNO` dans le cas non linéaire) calculé sur les mailles volumiques (`MODELISATION='3D'` ou `'3D_SI'`), de la façon suivante:

- Calcul des champs de contraintes aux nœuds des faces des éléments 3D.

- Moyennation de chacune des composantes du tenseur des contraintes au centre des faces d'éléments
- Projection du tenseur des contraintes suivant un vecteur normal (`SIG_N`) à la face et suivant un vecteur le plan tangent à la face (`SIG_T`).
- Diagonalisation du tenseur des contraintes dans le plan tangent (`SIG_T1` et `SIG_T2`)

2.5.2 Options de calcul des déformations

| `'DEGE_ELNO'`

Calcul des déformations généralisées par élément aux nœuds à partir des déplacements ; cette option n'a de sens que pour les éléments de structure (poutre, plaque, tuyau).
Les déformations généralisées sont obtenues dans le repère local de l'élément.

| `'EPFP_ELNO'`
`'EPFP_ELGA'`

Calcul (aux nœuds ou aux points de Gauss) des déformations de fluage propre associées au modèle `GRANGER_FP` ou au modèle `BETON_UMLV_FP` (pour les bétons).

| `'EPFD_ELNO'`
`'EPFD_ELGA'`

Calcul (aux nœuds ou aux points de Gauss) des déformations de dessiccation des bétons, pour le modèle `BETON_UMLV_FP`).

| `'EPME_ELNO'`
`'EPME_ELGA'`

Calcul (aux nœuds ou aux points de Gauss) des déformations ''mécaniques'' à partir des déplacements. Ce calcul est fait en théorie des ''**petits déplacements**''. Les déformations calculées sont égales aux déformations totales moins les déformations thermiques.

$$\varepsilon_{ij}^{m}(u)=\frac{1}{2}\left(u_{i,j}+u_{j,i}\right)-\varepsilon^{th}$$

| `'EPMG_ELNO'`
`'EPMG_ELGA'`

Calcul (aux nœuds ou aux points de Gauss) des déformations ''mécaniques'' à partir des déplacements. Ce calcul est fait en théorie des ''**grands déplacements**''. Les déformations calculées sont égales aux déformations totales moins les déformations thermiques.

$$E_{ij}^{m}(u)=\frac{1}{2}\left(u_{i,j}+u_{j,i}+u_{k,i}u_{k,j}\right)-\varepsilon^{th}$$

| `'EPSG_ELGA'`

Déformations de Green Lagrange aux points de Gauss.

$$E_{ij}(u)=\frac{1}{2}\left(u_{i,j}+u_{j,i}+u_{k,i}u_{k,j}\right)$$

| `'EPSG_ELNO'`

Déformations de Green Lagrange aux nœuds.

| `'EPSI_ELNO'`
`'EPSI_ELGA'`

Calcul des déformations par élément aux nœuds (ou aux points de Gauss) à partir des déplacements.

$$\varepsilon_{ij}(u)=\frac{1}{2}\left(u_{i,j}+u_{j,i}\right)$$

Pour les éléments de structure, ces déformations sont obtenues dans le repère local de l'élément. Pour les plaques et coques, elles sont calculées dans la couche et à l'altitude demandée dans le mot-clé `REPE_COQUE` (cf §2.3).

| `'EPTU_ELNO'`

Calcul des déformations **dans une couche** et pour un secteur angulaire d'éléments tuyau (voir le mot clé `REPE_COQUE`).

| `'EPSP_ELGA'`

Déformations anélastiques aux points de Gauss. A partir du champ de déplacements (u), de contraintes (σ), de températures T, de déformations anélastiques éventuelles ε^a, et de variables internes, on calcule à chaque instant : $\varepsilon^p=\varepsilon(u)-A^{-1}\sigma-\varepsilon^{th}(T)-\varepsilon^a-\varepsilon^{fl}$ où ε^{fl} est la déformation de fluage propre de Granger.

| `'EPSP_ELNO'`

Déformations anélastiques obtenues par extrapolation aux nœuds des valeurs aux points de Gauss (cf. `EPSP_ELGA`).

| `'EPVC_ELNO'`
`'EPVC_ELGA'`

Calcul des déformations (aux noeuds ou aux points de Gauss) liées aux variables de commande. Pour l'instant ne sont définies que les composantes suivantes :

- déformations thermiques : `EPTHER_L`, `EPTHER_T`, `EPTHER_N` telle que : $\varepsilon_i^{th}=\alpha_i(T-T_{ref});i\in\{L,T,N\}$ (si le matériau est isotrope, les 3 composantes sont égales), T étant la température et α_i le coefficient de dilatation ;
- le retrait de séchage `EPSECH` (utilisé pour les lois décrivant le comportement du béton) $\varepsilon^{sech}=-K_{dessic}(S_{ref}-S)$, S étant la variable de commande séchage et K_{dessic} le coefficient de retrait de dessiccation ;
- le retrait d'hydratation `EPHYDR` (utilisé pour les lois décrivant le comportement du béton) $\varepsilon^{hydr}=-B_{endog}h$, h étant la variable de commande hydratation, et B_{endog} étant le coefficient de retrait endogène.

2.5.3 Options d'interpolation et d'extraction des variables internes

| `'VARI_ELNO'`

Calcul des variables internes aux nœuds des éléments à partir des points de Gauss.

Le nombre et le type de ces variables internes sont spécifiques à chaque modèle de comportement (cf. doc U4 de `STAT_NON_LINE` par exemple).

| `'VATU_ELNO'`

Calcul des variables internes **dans une couche** et pour un secteur angulaire d'éléments tuyau (mots clés `REPE_COQUE / NUME_COUCHE, NIVE_COUCHE` et `ANGLE`).

| `'VACO_ELNO'`

Calcul des variables internes dans une couche d'éléments coque définie par `NUME_COUCHE` et `NIVE_COUCHE`.

| 'EXTR_ELNO', 'EXTR_ELGA'

Extraction des **variables internes en THM uniquement** (respectivement aux nœuds par éléments et aux points de Gauss).
Pour pouvoir post traiter les variables internes en THM de façon plus conviviale, des champs ont été créés. Le principe de ces champs est d'extraire du champ VARI_ELGA (ou VARI_ELNO pour le cham_elem aux nœuds) la variable interne qui nous intéresse via un mot clé plus parlant que $V1$, $V2$,...

◊ NOM_VARI = / nom_vari, [TXM]

Le nom des nouveaux champs est EXTR_ELGA et EXTR_ELNO pour les cham_elem et EXTR_NOEU pour le cham_no.

En tant que post traitement ces champs sont calculés par CALC_ELEM et CALC_NO. La syntaxe à utiliser est la suivante :

•pour un cham_elem

```
GAMP=CALC_ELEM(RESULTAT=U1,
  OPTION='EXTR_ELNO',
   NOM_VARI='GAMP'); ----------->
```

nouveau mot clé pour indiquer quelle variable on souhaite extraire via un nom codé

•pour un cham_no

```
GAMP=CALC_NO(reuse=GAMP,
  RESULTAT=GAMP,
  OPTION='EXTR_NOEU');
```

Puisqu'il s'agit juste d'extraire une (et une seule!!) variable interne, les cham_elem correspondants doivent avoir été calculés au préalable.

La liste des différents noms symboliques des variables internes est :

"DPORO"	:	variation de la porosité du matériau
"DRHOLQ"	:	variation de la masse volumique du matériau
"DPVP"	:	variation de la pression de vapeur
"SATLIQ"	:	saturation du liquide
"EVP"	:	déformation plastique volumique cumulée
"IND_ETA"	:	Indicateur d'état mécanique
"D"	:	Valeur de l'endommagement
"IND_END"	:	Indicateur d'endommagement
"TEMP_MAX"	:	Température maximale
"GAMP"	:	Déformation déviatoire plastique cumulée
"PCR"	:	Pression critique
"SEUIL_HYD"	:	Seuil hydrique
"IND_HYD"	:	Indicateur d'irréversibilité hydrique
"PCOHE"	:	Pression de cohésion
"COMP_ROC"	:	Comportement de la roche
"SEUIL_ISO"	:	Seuil isotrope
"ANG_DEV"	:	Angle du seuil déviatoire
"X11"	:	Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X22"	:	Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X33"	:	Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X12"	:	Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X13"	:	Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"X23"	:	Composantes du tenseur d'écrouissage cinématique
"DIST_DEV"	:	Distance normalisée au seuil déviatoire

"DEV_SUR_CRIT"	:	Rapport entre le seuil déviatoire et le seuil déviatorique critique
"DIST_ISO"	:	Distance normalisée au seuil isotrope
"NB_ITER"	:	Nombre d'itérations internes
"ARRET"	:	Valeur du test local d'arrêt du processus itératif
"NB_REDE"	:	Nombre de redécoupage local du pas de temps
"SIGNE"	:	Signe du produit contracté de la contrainte déviatorique par la déformation plastique déviatorique

Remarque :

Lorsque la variable à extraire ne fait pas partie des variables internes des lois concernées, une alarme est émise mais le champ est tout de même affecté à R8VIDE().

2.5.4 Options de calcul d'énergie

| 'ECIN_ELEM'

Énergie cinétique d'un élément.

| 'ENEL_ELNO'
'ENEL_ELGA'

Calcul de la densité d'énergie élastique aux points de Gauss ou aux nœuds de chaque élément.

Cette option diffère de l'option EPOT_ELEM qui calcule l'énergie de déformation élastique intégrée dans chaque élément, cette énergie étant un scalaire pour un élément donné. Ici, on calcule la densité d'énergie élastique qui s'écrit :

$$E_p = \frac{1}{2} \sigma A^{-1} \sigma$$

Ce calcul s'appuie sur le champ de contraintes aux points de Gauss, obtenu par SIEF_ELGA ou SIEF_ELGA.

| 'ETOT_ELGA'
'ETOT_ELNO'

Calcul de l'incrément de densité d'énergie de déformation totale aux points de Gauss ou aux nœuds de chaque élément entre l'instant courant et l'instant précédent.

| 'ETOT_ELEM'

Calcul de l'incrément d'énergie de déformation totale d'un élément entre l'instant courant et l'instant précédent. Lorsque cette option est appliquée à tout le maillage et pour des comportements différents de VMIS_ISOT_LINE et VMIS_ISOT_TRAC , la somme de chacun des incréments d'énergie donne le même le résultat que celui obtenu par la commande ENER_TOTALE de l'opérateur POST_ELEM. Pour les deux comportements VMIS_ISOT_LINE et VMIS_ISOT_TRAC , le résultat est différent puisque l'opérateur POST_ELEM utilise un traitement spécifique pour le calcul de l'énergie de déformation totale.

| 'DISS_ELNO'
'DISS_ELGA'

Calcul de l'énergie de dissipation aux points de Gauss ou aux nœuds de chaque élément.
Valable uniquement pour les éléments DKTG et la loi GLRC_DM. Leurs expressions sont données dans la doc R de la loi de comportement.

| 'EPOT_ELEM'

Calcul de l'énergie potentielle de déformation intégrée sur un élément, à partir des déplacements U et des températures T

- pour les éléments de milieux continus 2D et 3D :

$$EPOT=\frac{1}{2}\int_{element}\varepsilon(U)A\,\varepsilon(U)dv\;-\int_{element}\varepsilon(U)A\,\varepsilon^{th}(U)dv+\frac{1}{2}\int_{element}\varepsilon^{th}(U)A\,\varepsilon^{th}(U)dv$$

- pour les éléments de poutres :

$$EPOT=\frac{1}{2}U^T K_e U-U^T B^T A\varepsilon^{th}+\frac{1}{2}\varepsilon^{th}A\varepsilon^{th}$$

- et pour les éléments de plaques et coques :

$$EPOT=\frac{1}{2}U^T K_e U-U^T B^T A\varepsilon^{th}$$

2.5.5 Options de calcul de critères

| `'CRIT_ELNO'`

Calcul des critères de rupture pour les coques en matériaux composites [R4.01.01]. A partir des contraintes calculées pour une couche donnée (option `'SIGM_ELNO'`, et mots clés `NUME_COUCHE` et `NIVE_COUCHE`), et des contraintes limites fournies sous `ELAS_ORTH` dans `DEFI_MATERIAU`, le champ `'CRIT_ELNO'` contient 6 composantes :

`CRIL` = $\frac{\sigma_L}{X_T}$ critère de rupture en traction dans le sens L, si $\sigma_L>0$

`CRILP` = $\frac{\sigma_L}{X_C}$ critère de rupture en compression dans le sens L, si $\sigma_L<0$

`CRIT` = $\frac{\sigma_T}{Y_T}$ critère de rupture en traction dans le sens T, si $\sigma_T>0$

`CRITP` = $\frac{\sigma_T}{Y_C}$ critère de rupture en compression dans le sens T, si $\sigma_T<0$

`CRILT` = $\frac{|\sigma_{LT}|}{S_LT}$ critère de rupture en cisaillement

et
`CRITH` = critère de Tsai-Hill
(voir exemple dans test SSLS121 [V3.03.121]

Toutes ces quantités sont calculées dans le repère d'orthotropie de la coche considérée.

| `'ENDO_ELGA'`

Calcul du dommage d aux points de Gauss à partir du tenseur des contraintes et de la déformation plastique cumulée p. La cinétique d'endommagement est donnée par la loi de Lemaître-Sermage :

$$\dot{d}=\left[\frac{Y}{S}\right]^s\dot{p}\ \text{ si }\ p\geq p_{seuil}$$

avec $Y=\frac{\sigma^{*2}}{2E(1-D)^2}$

où S et s sont des coefficients caractéristiques du matériau et p_{seuil} le seuil d'endommagement lié à l'énergie stockée dans le matériau (si $s=1$ on obtient la loi de Lemaître classique).

Calcul systématique du taux de triaxialité α et de la contrainte équivalente d'endommagement σ^* :

$$\texttt{SI_ENDO} : \sigma^* = \sigma_{eq}\sqrt{\frac{2}{3}(1+\nu)+3(1-2\nu)\alpha^2}$$

$$\texttt{TRIAX} : \alpha = \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}}$$

$$\text{avec : } \begin{aligned} s &= \sigma - \frac{1}{3}tr(\sigma)\cdot I \\ \sigma_{eq} &= \sqrt{\frac{3}{2}s:s} \\ \sigma_h &= \frac{1}{3}tr(\sigma) \end{aligned}$$

Calcul du dommage total par cumul linéaire

$$\texttt{D_CUMULE} : D = \sum_i D_i :$$

TRIAX	valeur du taux de triaxialité
SI_ENDO	valeur de la contrainte d'endommagement de Lemaître-Sermage
COENDO	valeur de la contrainte d'endommagement de Lemaître-Sermage normalisée
DOM_LEM	valeur du dommage de Lemaître-Sermage
D_CUMULE	valeur du dommage de Lemaître-Sermage cumulé

| 'ENDO_ELNO'

Endommagement de Lemaitre-Sermage obtenues par extrapolation aux nœuds des valeurs aux points de Gauss (cf. ENDO_ELGA).

| 'EPEQ_ELGA'
| 'EPMQ_ELGA'

Déformations "équivalentes" aux points de Gauss (calculées à partir des champs EPSI_ELGA, ou EPME_ELGA) :

INVA_2 : déformation équivalente de Von Mises : $\text{INVA_2} = \sqrt{\frac{2}{3}dev(\varepsilon)_{ij}\,dev(\varepsilon)_{ji}}$

avec $dev(\varepsilon)_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}tr(\varepsilon)\delta_{ij}$

INVA_2SG : déformation équivalente de Von Mises signée par la trace de ε

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : déformations principales

Pour les éléments TUYAU, les composantes calculés sont INVA_2 et INVA_2SG

| 'SIEQ_ELGA'

Contraintes "équivalentes" aux points de Gauss :

VMIS : contrainte de von Mises : $\text{VMIS} = \sqrt{\frac{3}{2}s_{ij}s_{ji}}$ avec $s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}tr(\sigma)\delta_{ij}$

VMIS_SG : contrainte de von Mises signée par la trace de σ

TRESCA : contrainte de Tresca

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : contraintes principales

VECT_1_X, VECT_1_Y, ..., VECT_3_Z : contraintes, déformations et directions principales, uniquement pour les modélisations ci-dessous :

- 3D, 3D_SI, 3D_GRAD_VARI
- SHB8 seulement pour les contraintes
- AXIS, AXIS_SI, AXIS_GRAD_VARI
- D_PLAN, D_PLAN_SI, D_PLAN_GRAD_EPSI, D_PLAN_GRAD_VARI
- C_PLAN, C_PLAN_SI, C_PLAN_GRAD_EPSI, C_PLAN_GRAD_VARI

Pour les éléments TUYAU, les composantes calculés sont VMIS et VMIS_SG et leur version signée *_SG.

| 'EPEQ_ELNO'
| 'EPMQ_ELNO'

Déformations "équivalentes" aux nœuds (calculées à partir des champs EPSI_ELNO, ou EPME_ELNO) :

INVA_2 : déformation équivalente de Von Mises

INVA_2SG : déformation équivalente de Von Mises signé par la trace de ε

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : déformations principales

On note que les déformations équivalentes obtenues à partir de EPSI_ELNO et EPME_ELNO sont identiques. En effet, la différence entre les deux tenseurs est un tenseur sphérique (déformation thermique). Comme la déformation équivalente est obtenue à partir du second invariant du déviateur, le tenseur sphérique « disparait » lorsque l'on prend le déviateur.

| 'SIEQ_ELNO'

Contraintes "équivalentes" aux nœuds :

VMIS : contrainte de von Mises

VMIS_SG : contrainte de von Mises signée par la trace de σ

TRESCA : contrainte de Tresca

PRIN_1, PRIN_2, PRIN_3 : contraintes principales

Pour les éléments de milieux continus 2D et 3D, elles sont extrapolées aux nœuds à partir des contraintes équivalentes calculées aux points de Gauss, elles-mêmes calculées à partir des champs de contraintes aux points de Gauss (SIEF_ELGA en linéaire, et SIEF_ELGA en non linéaire).

Dans le cas où on calcule ensuite les valeurs moyennées aux nœuds, par l'option 'SIEQ_NOEU' de CALC_NO, du fait des interpolations, on n'a pas forcément VMIS = ABS(VMIS_SG).

Pour les éléments de coques, elles sont calculées directement sur les contraintes locales (en un point de l'épaisseur) aux nœuds (SIGM_ELNO en linéaire et SICO_ELNO en non linéaire).

| 'INDL_ELGA'

Indicateur de localisation, basé sur le tenseur acoustique (critère de RICE), défini par : $det(N.H.N) \leq 0$, où H désigne l'opérateur tangent et N la normale aux directions de localisation. Cet indicateur défini un état à partir duquel le problème local d'intégration du comportement perd son caractère d'unicité.

La méthode n'est développée que dans le cas 2D et pour la loi de comportement de type DRUCKER_PRAGER.

L'option INDL_ELGA contient les composantes suivantes :

INDICE : Indicateur de localisation valant 0 si $det(N.H.N) > 0$,et valant 1 sinon, ce qui correspond a l'initiation de la

localisation,

DIR1 : correspond à la première normale à la zone de localisation,
DIR2 : à la deuxième normale
DIR3 : à la troisième normale
DIR4 : à la quatrième normale

| 'EPTQ_ELNO'
| 'SITQ_ELNO'

Calcul des déformations généralisées et des contraintes pour un éléments tuyau. Ce sont des valeurs équivalentes de type SIEQ_ELGA et EPEQ_ELGA en un point de la section. C'est une extraction effectuée suivant le même principe que l'option déjà existante SITU_ELNO. Le calcul des déformations s'effectue dans une couche et un secteur angulaire d'éléments tuyau.

| 'PMPB_ELGA'
| 'PMPB_ELNO'

Calcul de critères du RCC-M G3000 pour les éléments de poutres POU_D_E et POU_D_T. Deux quantités sont calculées : PM et PMPB.

$$\text{PM}=\left|\frac{N}{S}\right|$$
$$\text{PMPB}=\left|\frac{N}{S}\right|+\frac{M\cdot R}{I} \quad avec \quad M=\sqrt{M_y^2+M_z^2}$$

Ceci correspond à la valeur maximum de SIXX dans une section circulaire [R3.08.01].

PMPB_ELGA : valeurs de PM et PMPB aux points de Gauss, calculées à partir de SIEF_ELGA.
PMPB_ELNO : valeurs de PM et PMPB aux nœuds, calculées à partir de SIEF_ELNO.

En toute rigueur, ces critères sont à appliquer aux contraintes primaires. Cette distinction est à faire par l'utilisateur.

2.5.6 Options de calcul d’indicateurs d’erreur

| 'DERA_ELGA'

Indicateur local de décharge et indicateur de perte de radialité aux points de Gauss [R4.20.01].

| 'DERA_ELNO'

Indicateur local de décharge et indicateur de perte de radialité aux nœuds [R4.20.01].

Remarque :

Pour les options DERA_ELGA et DERA_ELNO , il faut savoir que le calcul nécessite de comparer les champs de contraintes aux instants t_i et t_{i+1} . Le résultat est rangé au numéro d'ordre associé à l'instant t_i .

L'indicateur de décharge est calculé par : $ID=\frac{\|\sigma_{i+1}\|-\|\sigma_i\|}{\|\sigma_{i+1}\|}$.

Par défaut, le calcul se fait pour les numéros d'ordre 1 à $n-1$.

Si on précise la liste d'instant (avec des "trous" éventuellement), le calcul ne concernera que les instants demandés mais il comparera toujours l'instant t_i avec l'instant t_{i+1} dans la liste des instants ayant servi à faire le calcul non-linéaire.

| 'ERZ1_ELEM' (respectivement 'ERZ2_ELEM')

Calcul de l'estimateur d'erreur de ZHU-ZIENKIEWICZ (élasticité linéaire 2D) à partir de l'option `'SIZ1_NOEU'` (respectivement `'SIZ2_NOEU'`). Si ce dernier champ n'existe pas dans `resu`, il est automatiquement construit au préalable, voir [R4.10.01].

| `'ERME_ELEM'`

Estimateur d'erreur en résidu en mécanique [R4.10.02] et en hydro-mécanique stationnaire [R4.10.04] calculé par élément.

Conseils d'utilisation de l'option ERME_ELEM

Pour bien effectuer l'estimation d'erreur du calcul mécanique (dans les limites théoriques de la formule mise au point dans le cadre elliptique avec frontière régulière....), il faut l'effectuer sur tout le modèle :

`TOUT = 'OUI'` (valeur par défaut)
A noter que le modèle n'est pas forcément défini sur toute la géométrie.

Il faut aussi effectuer préalablement dans `CALC_ELEM` le calcul des contraintes aux nœuds (cf. [R3.06.03]), par `SIGM_ELNO` en linéaire, par `SIEF_ELNO` en non linéaire. Sinon une alarme est émise et le calcul d'erreur n'est pas effectué sans provoquer l'arrêt de l'exécution. Si le champ de contraintes aux nœuds existe déjà dans la structure de données `resultat` il n'est pas recalculé.

- En ce qui concerne les chargements :
  Il faut fournir à `CALC_ELEM` les chargements utilisés pour le calcul mécanique :
  `EXCIT=_F(CHARGE=....)`
  en prenant bien garde aux règles de surcharges différentes pour le solveur mécanique et pour cette option de `CALC_ELEM`.
  Ainsi, le calcul mécanique (`MECA_STATIQUE`, `STAT_NON_LINE` ...) agrège les conditions aux limites alors que le calcul de l'erreur ne va retenir, pour un type de conditions aux limites donné, que la dernière listée dans le `EXCIT` de `CALC_ELEM`.
  L'ordre a donc une importance cruciale ! Il ne faut donc, pour un type de conditions aux limites, qu'une seule occurrence dans les `AFFE_CHAR` ...

  On ne tient compte que des chargements de type : `PESANTEUR`, `ROTATION`, `FORCE_INTERNE`, `PRES_REP`, `FORCE_FACE`, `FORCE_ARETE`.
  Seules les trois derniers peuvent être variables.

  Il est conseillé d'utiliser des éléments finis d'ordre deux dans le cas de forces volumiques, sinon ce terme est très mal calculé puisque DIV(SIGMA) est quasi nul !

  Pour prendre en compte l'erreur relative à une CL nulle il faut l'imposer en tant que fonction via un `AFFE_CHAR_MECA_F`. Via une constante, elle ne sera pas prise en compte.

- Maillage :

  Le maillage doit être triangulaire, quadrangle, tétraédrique ou hexaédrique, avec aucun `GROUP_NO` si on veut remailler ensuite via HOMARD.

- En 2D, il ne prend en compte que les erreurs sur (et entre) les éléments isoparamétriques SEG2/3, TRIA3/6, QUAD4/8/9.
  En 3D, idem avec FACE3/4/6/8/9, TETRA4/10, PENTA6/13/15 et HEXA8/20/27... donc pas les PYRAM ni les éléments de structure (coque, plaque, poutre...).
- D'autre part, il faut veiller à ne pas intercaler de segments entre deux quadrangles ou deux triangles (resp. quad ou triangle entre deux hexa), sinon on ne peut pas calculer le terme de saut relatif à ce voisinage. A la place, on s'enquiert (à tort) d'une éventuelle condition aux limites.

| `'ERME_ELNO'`

Estimateur d'erreur en résidu calculé aux nœuds [R4.10.02].

| `'ERRE_ELGA_ELEM'`

Estimateur d'erreur en résidu calculé aux points de Gauss [R4.10.02].

| `'QIZ1_ELEM'` (respectivement `'QIZ2_ELEM'`)

Estimateur d'erreur en quantités d'intérêt basé sur la méthode de Zhu-Zienkiewicz (élasticité linéaire 2D).

| `'QIRE_ELEM'`

Estimateur d'erreur en quantités d'intérêt basé sur les résidus en mécanique, calculé par élément.

Conseil d'utilisation des options 'QIZ1_ELEM', 'QIZ2_ELEM', 'QIRE_ELEM'

Le domaine d'utilisation des options 'QIZ1_ELEM' et 'QIZ2_ELEM' est le même que pour les options 'ERZ1_ELEM' et 'ERZ2_ELEM' et celui de l'option 'QIRE_ELEM' est le même que celui de l'option 'ERME_ELEM' en mécanique.

Il est nécessaire de définir, en plus du problème initial (problème primal), un second problème (problème dual). Ce problème définit de manière sous-jacente la quantité d'intérêt sur laquelle on veut obtenir une erreur. A ce jour, seulement deux quantités d'intérêt sont disponibles :
- Moyenne d'une composante du déplacement ;
- Moyenne d'une composante du tenseur des contraintes.

Le problème dual diffère du problème primal **uniquement** par son chargement (celui-ci étant la quantité d'intérêt), **les conditions de bords restant les mêmes**. Ainsi le chargement à imposer sur le sous-domaine voulu, par le biais de la commande AFFE_CHAR_MECA, est :
- FORCE_INTERNE, effort unitaire pour la composante voulue du déplacement ;
- EPSI_INIT, déformation unitaire pour la composante voulue du tenseur des contraintes.

Une fois les deux problèmes résolus, on calcule pour chacun des deux l'estimateur d'erreur « classique » désiré (le même pour les deux…) et enfin il faut définir un nouveau CALC_ELEM avec une des options de calcul d'estimateur d'erreur en quantité d'intérêt.

Un exemple d'utilisation du calcul de l'estimateur en quantités d'intérêt basé sur les résidus peut être trouvé dans le test sslv113c et d.

| `'QIRE_ELNO'`

Estimateur d'erreur en quantités d'intérêt basés sur les résidus calculé aux nœuds.

| `'SIZ1_NOEU'`

Calcul des contraintes aux nœuds (élasticité linéaire 2D) ; les contraintes sont obtenues par un lissage global (au sens des moindres carrés) des contraintes aux points de GAUSS. Voir Estimation d'erreur par lissage des contraintes [R4.10.01].

| `'SIZ2_NOEU'`

Calcul des contraintes aux nœuds (élasticité linéaire 2D) ; les contraintes sont obtenues par un lissage local à un patch d'éléments (au sens des moindres carrés) des contraintes aux points de GAUSS, voir [R4.10.01].

```
|  'SING_ELEM'
   ♦  PREC_ERR  =  err               [R]
   ◊  TYPE_ESTI =  'ERME_ELEM',
                   'ERZ1_ELEM',
                   'ERZ2_ELEM',
                   'QIRE_ELEM',
                   'QIZ1_ELEM',
```

'QIZ2_ELEM',

Cette option ([R4.10.04]) vise à améliorer le traitement des singularités dans les stratégies d'adaptation de maillage (en l'occurrence avec HOMARD). En pratique les indicateurs d'erreur sont élevés dans les zones singulières si bien que rapidement seules les zones singulières sont raffinées et masquent donc les autres zones sensibles (zones à fort gradient) que l'on souhaiterait raffiner.

Cette option est un champ constant par élément et comporte trois composantes :

1) 'DEGRE' qui correspond à la détection des éléments finis singuliers. En pratique, cette composante vaut le degré d'interpolation des éléments finis choisis si l'élément fini n'est connecté à aucune singularité et vaut l'ordre de la singularité si l'élément fini est connecté à un nœud considéré par la méthode comme singulier (par exemple pour un élément voisin de la pointe d'une fissure, cette valeur vaut 0.5).
2) 'RAPPORT' qui correspond à la carte de modification de taille des éléments finis en cas de remaillage pour une erreur globale donnée. Cette composante est égale au rapport entre la nouvelle taille de l'élément fini et la taille actuelle.
3) 'TAILLE' qui correspond à la carte des nouvelles tailles des éléments finis en cas de remaillage pour une erreur globale donnée. Cette donnée est directement utilisable par certains mailleur (GMSH par exemple)

Cette option peut s'utiliser selon deux schémas :

•Les éléments finis considérés comme « singuliers » par la méthode peuvent être exclus du processus de découpage (en leur affectant par exemple une erreur nulle),

•la nouvelle taille des éléments finis est donnée à un remailleur (en l'occurrence HOMARD pour Code_Aster) pour que celui-ci construise le nouveau maillage en respectant au mieux cette nouvelle carte de taille. Actuellement, le logiciel HOMARD découpe une fois l'élément (par exemple en 2D, un triangle est divisé en 4 mais pas plus). Pour continuer le découpage, il faut faire appel de nouveau à HOMARD. Une évolution est donc à prévoir pour qu'on puisse diviser plusieurs fois un élément et donc respecter au mieux la carte de taille du nouveau maillage.

Le calcul de cette option nécessite, au préalable, le calcul d'un indicateur d'erreur (c'est la composante absolue qui est utilisée et c'est codé en dur dans Aster) et de l'énergie de déformation totale. Dans le cas où l'une de ces options n'est pas calculée, un message d'alarme est émis et l'option 'SING_ELEM' n'est pas calculée.

- Pour l'indicateur d'erreur, quatre choix sont possibles :
  - 'ERME_ELEM' pour l'indicateur en résidus,
  - 'ERZ(1 ou 2)_ELEM_SIGM' pour l'indicateur de Zhu-Zienkiewicz (versions 1 ou 2),
  - 'QIRE_ELEM' pour l'indicateur en quantité d'intérêt basé sur les résidus,
  - 'QIZ(1 ou 2)_ELEM_SIGM' pour l'indicateur en quantité d'intérêt basé sur Zhu-Zienkiewicz (versions 1 ou 2),
  - Si les six indicateurs sont présents et que rien n'est précisé avec 'TYPE_ESTI', l'indicateur en résidu 'ERME_ELEM' est choisi par défaut (message d'alarme émis). Si les deux indicateurs de Zhu-Zienkiewicz sont présents, on choisit 'ERZ1_ELEM'.

- Pour l'énergie de déformation totale, on utilise :
  - Avec STAT_NON_LINE : 'ETOT_ELEM' qui est l'énergie de déformation totale sur un élément fini (valable pour un comportement élastique et pour un comportement élastoplastique 'VMIS_ISOT_XXX').
  - Avec MECA_STATIQUE : 'EPOT_ELEM' qui est l'énergie potentielle de déformation élastique sur un élément fini et intégrée à partir des déplacements et de la température (valable uniquement pour un comportement élastique).

L'utilisateur doit également renseigner le mot-clé 'PREC_ERR' (un message fatal est émis en cas d'absence) qui permet de calculer la précision souhaitée sur l'erreur globale pour déterminer la carte de modification de taille (cf [R4.10.04]). La valeur de 'PREC_ERR' est

comprise strictement entre 0 et 1 (un message fatal est émis si cette condition n'est pas vérifiée).

Le périmètre d'utilisation est le même (mais plus réduit) que celui de l'indicateur d'erreur choisi à savoir :

- Pour l'indicateur en résidu : éléments finis des milieux continus en 2D (triangles et quadrangles) ou 3D (uniquement les tétraèdres) pour un comportement élastoplastique,
- Pour l'indicateur de Zhu-Zienkiewicz : éléments finis des milieux continus en 2D (triangles et quadrangles) pour un comportement élastique.

En toute rigueur, le calcul de l'ordre de la singularité est obtenu à partir de l'énergie théorique en pointe de fissure, équation valable uniquement en élasticité. L'utilisation de cette option en élastoplasticité est donc à manipuler avec prudence.

| `'SING_ELNO'`

Détection des singularités et carte de modification de tailles aux nœuds par éléments. Le calcul préalable de `'SING_ELEM'` est donc nécessaire. Si `'SING_ELEM'` est absent, un message d'alarme est émis et l'option `'SING_ELNO'` n'est pas calculée.

2.5.7 Autres options

| `'VNOR_ELEM_DEPL'`

Projection d'un champ de vitesse sur la normale des éléments de type coque ou plaque. Cette option sert notamment au chaînage avec le code VARIA.

| `'VARC_ELGA'`

Calcul des variables de commandes ayant servi à un calcul mécanique.
7 variables sont systématiquement calculées :
`TEMP, HYDR, SECH, CORR, IRRA, NEUT1, NEUT2`
Remarque : Les variables qui n'ont pas été définies sont initialisées à la valeur `R8VIDE`() (nombre réel très grand de l'ordre de `1.D308`)

| `'SPMX_ELGA'`

```
♦  NOM_CHAM = ch                    [cham_elem_*]
♦  NOM_CMP  = cmp                   [TXM]
```

Extraction des valeurs extrémales, en chaque point de Gauss linéique d'un élément de tuyau, de la composante `cmp` du champ `ch`, sur tous les points d'intégration de la section.
Les champs possibles sont : les champs de contraintes (`SIEF_ELGA_`, `SIEF_ELGA`), les champs de déformations (`EPSI_ELGA`), les champs de valeurs équivalentes (`SIEQ_ELGA`, `EPEQ_ELGA`), les champs de variables internes (`VARI_ELGA`).

Le champ crée de nom `SPMX_ELGA` contient pour chaque instant les composantes :

MIN	valeur minimum
MAX	valeur maximum
NCOUMIN	numéro de la couche pour la valeur min
NCOUMAX	numéro de la couche pour la valeur max
NSEGMIN	numéro du secteur angulaire pour la valeur min
NSEGMAX	numéro du secteur angulaire pour la valeur max
NPCOUMIN	numéro du point de la couche NCOUMIN
NPCOUMAX	numéro du point de la couche NCOUMAX
NPSECMIN	numéro du point sur le secteur NSECMIN
NPSECMAX	numéro du point sur le secteur NSECMAX

2.5.8 Option de calcul des flux hydrauliques (éléments THM)

```
TYPE_OPTION =     'FLUX',
     ♦  OPTION   =   'FLHN_ELGA'
```

Calcul des flux hydrauliques $\phi_{ij}=M_{ij}\cdot v$ aux points de Gauss sur les éléments de bord (2D ou 3D) à partir du vecteur flux aux noeuds (l'option 'SIEF_NOEU' doit avoir été calculée au préalable).
Où M_{ij} est le vecteur flux hydraulique du composant ij **.** [U2.04.05]
L'intégrale des flux sur une surface est effectuée dans POST_ELEM par intégration de ce champ.

2.6 Opérandes pour les options thermiques

2.6.1 Opérande OPTION

| `'FLUX_ELGA'`

Calcul des flux de chaleur aux points d'intégration de GAUSS à partir de la température.

| `'FLUX_ELNO'`

Calcul des flux de chaleur aux nœuds à partir de la température.

| `'ERTH_ELEM'`,
| `'ERTH_ELNO'`

Estimateurs d'erreur en résidu en thermique. [R4.10.03]. Il faut préalablement effectuer dans `CALC_ELEM` le calcul des flux aux nœuds via `FLUX_ELNO`.
Le mot-cle `INFO` procure tous les affichages intermédiaires du calculs (connectivités, normales, diamètres, valeurs des champs, jacobien).
L'option `'ERTH_ELNO'` permet de ramener le champ par élément `ERTH_ELEM` a un champ aux nœuds par élément, ce qui permet de faire des relevés de valeurs ou des impressions / visualisations.

| `'SOUR_ELGA'`

Calcul d'une source de chaleur (pouvant être introduite dans un calcul thermique via le mot clé `SOURCE = (SOUR_CALCULEE : …)` de la commande `AFFE_CHAR_THER` [U4.44.02].

Cette source est calculée à partir d'un potentiel électrique via la loi d'Ohm. Ce potentiel électrique doit avoir été calculé par l'opérateur `THER_LINEAIRE` [U4.54.01] en faisant les analogies nécessaires.

| `'DURT_ELGA_META'`
`'DURT_ELNO'`

Calcul de dureté (aux points de Gauss ou aux nœuds) à partir des phases métallurgiques (cf. [R4.04.01]).

| `'HYDR_ELNO'`

Calcul de l'hydratation aux nœuds à partir de l'hydratation aux points de Gauss, calculée par `THER_NON_LINE` pour la modélisation du béton [R7.01.12].

2.7 Opérandes pour les options acoustiques

2.7.1 Opérande OPTION

| `'PRAC_ELNO'` Calcul de la pression aux nœuds en (partie réelle, partie imaginaire et décibels.)

| `'INTE_ELNO'` Calcul de l'intensité acoustique active et réactive aux nœuds.

Les définitions se trouvent dans [R4.02.01].

2.8 Opérande TITRE

◊ `TITRE = titre`

Titre que l'on veut donner au résultat de la commande [U4.02.01].

3 Exemples

3.1 Calcul du flux pour un evol_ther

```
evoth = CALC_ELEM (reuse=evoth,
                   RESULTAT   = evoth,
                   TOUT_ORDRE = 'OUI',
```

```
                          OPTION = 'FLUX_ELNO' )
```

3.2 Calcul de l'estimateur d'erreur `ZZ2` pour quelques instants d'un concept de type `evol_elas`

```
evolas = CALC_ELEM (reuse= evolas,
         RESULTAT = evolas ,
         INST = (1.,10.,20.),
         OPTION = 'ERZ2_ELEM' )
```

3.3 Contraintes aux points de GAUSS pour un calcul thermo-mécanique

```
evolas = CALC_ELEM (reuse= evolas,
         RESULTAT = evolas,
         TOUT_ORDRE = 'OUI',
         OPTION   ='SIEF_ELGA' )
```

3.4 Calcul des énergies potentielles pour un mode propre

```
mode = CALC_ELEM (reuse=mode,
        RESULTAT = mode,
        NUME_MODE = 3,
        OPTION ='EPOT_ELEM')
```

3.5 Calcul de l’endommagement de Lemaître ou de Lemaître-Sermage

```
evolas = CALC_ELEM(reuse = evolas,
        OPTION=('ENDO_ELGA','ENDO_ELNO',),
        RESULTAT= evolas,);
```